

Vliv n-butanolu na provozní parametry vznětového spalovacího motoru

EFFECT OF N-BUTANOL ON OPERATIONAL PARAMETERS OF COMPRESSION IGNITION ENGINE

Jakub Čedík, Bohuslav Peterka, Daniel Mader
Česká zemědělská univerzita v Praze

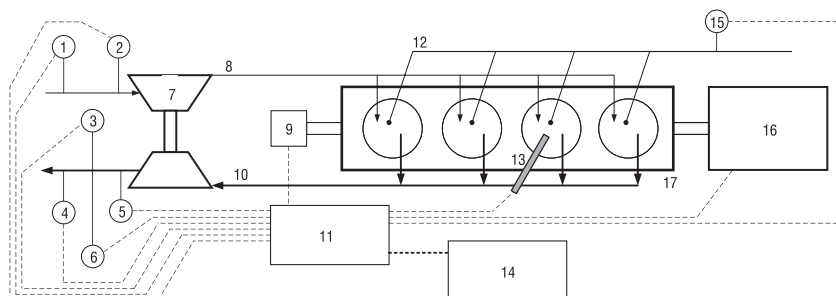
V současné době jsou hledány alternativy k fosilním palivům jako zdroje energie pro spalovací motory. Objevuje se celá řada řešení od elektromotorů, přes pneumomotory, až po spalovací motory provozované na biopaliva. K nejrozšířenějším biopalivům patří oleje a metylestery pro vznětové motory a ethanol pro motory zážehové (palivo E85) i vznětové (palivo E95 – pro použití tohoto paliva je třeba značná přestavba spalovacího motoru) (1).

Jedním z velmi zajímavých alternativních paliv je butanol. Butanol je čistý alkohol s podobným energetickým obsahem jako benzin. (2). Butanol je možné získat pomocí několika chemických technologií. Jeho produkce může probíhat s využitím kvasného procesu za pomoci bakterií rodu *Clostridium* (3, 4). Také lze vyrábět butanol petrochemickou cestou (5). Ve srovnání s ethanolem má n-butanol mnohem lepší mazací vlastnosti a snese

srovnání s motorovou naftou. Pro srovnání byl použit Reichert test, ze kterého vyplynulo, že mazací schopnost n-butanolu je přibližně o 15 % horší než motorové nafty a při směsi motorové nafty a 25 % n-butanolu pak horší o cca 10 % (6). Současně také proběhly testy, které porovnávaly agresivitu různých paliv vůči těsnicím kroužkům, a ukázalo se, že n-butanol v těchto testech nijak významně nevybočuje (7).

U většiny biopaliv se také projevuje jejich negativní působení na vlastnosti motorového oleje. Obvykle tak dochází například při použití paliva E85 k poklesu viskozity motorového oleje a objevuje se v něm větší množství vody (8). První dlouhodobější testy s palivem n-butanol ukazují, že při jeho použití k těmto negativním vlivům dochází v menší míře. I tak je třeba věnovat údržbě strojů zvýšenou pozornost (9, 10).

Obr. 1. Schéma měření



1 – snímač teploty a tlaku nasávaného vzduchu, 2 – snímač množství nasávaného vzduchu, 3 – snímač teploty výfukových plynů, 4 – analyzátor plyných složek výfukových plynů, 5 – analyzátor pevných složek výfukových plynů, 6 – kouřoměr, 7 – turbodmychadlo, 8 – sání vzduchu, 9 – snímač otáček spalov. motoru (inkrementální – 360 dílků na otáčku), 10 – výfukové potrubí, 11 – datalogger, 12 – palivové potrubí, 13 – snímač tlaku uvnitř spalovacího prostoru, 14 – řídicí počítač, 15 – snímač množství spotřebovaného paliva, 16 – dynamometr, 17 – blok motoru

Tab. I. Porovnání vlastností paliv pro vznětové motory

Palivo	Motorová nafta EN 590	N-butanol	95 % nafta 5 % n-butanol	80 % nafta 20 % n-butanol
Hustota při 15 °C (kg.m ⁻³)	819,13	815,27	817,97	817,08
Výhřevnost (MJ.kg ⁻¹)	43,3	33,1	42,8	41,3
Viskozita při 40 °C (mm ² .s ⁻¹)	1,798	2,266	1,713	1,705
Cetanové číslo	50	17*	—	—

Pramen: (21, 22)

Z palivářského hlediska se některé vlastnosti n-butanolu výrazněji liší od vlastností motorové nafty, zejména cetanové číslo (11). Srovnání vlastností paliv vhodných pro vznětové spalovací motory je uvedeno v tab. I. S výhodou lze však využít nižší viskozity n-butanolu zejména ve směsích s olejem (12, 13).

Co se týče výkonových a emisních parametrů spalovacího motoru při použití n-butanolu jako paliva, lze očekávat pokles výkonových parametrů a například pozitivní vliv na kouřivost, ale naopak negativní vliv na produkci oxidu uhelnatého spalovacím motorem. (14, 15). Jaký bude mít palivo dopad na provozní parametry spalovacího motoru lze odvodit i z průběhu tlaku ve spalovacím prostoru (16, 17, 18).

Cílem příspěvku je posoudit vliv použití n-butanolu ve směsi s naftou na parametry přepřínovaného spalovacího motoru (výkon, točivý moment a průběh tlaku ve spalovacím prostoru).

Materiál a metody

Měření bylo realizováno na přepřínovaném spalovacím motoru z traktoru Zetor Forterra 8641 s označením 1204 (jmenovitý výkon 60 kW – měřeno přímo na motoru) ke kterému byl přes vývodový hřídel připojen dynamometr Maha ZW 500 (max. točivý moment 6 600 Nm, max. otáčky 2 500 min⁻¹). Dále byly připojeny

snímače tlaku, teploty a množství nasávaného vzduchu, snímač množství a teploty spotřebovaných pohonných hmot, analyzátor pevných a plyných složek výfukových plynů, inkrementální snímač otáček (360 impulsů na jednu otáčku) a snímač tlaku ve spalovacím prostoru motoru (měřicí rozsah do 20 MPa, přesnost 1 %). Schéma zapojení je zobrazeno na obr. 1.

Sledované režimy motoru byly vybrány podle NRSC (non-road steady cycle) testu, který je pro tento typ motoru předepsán normou ISO 8178-4 (typ C1) a stanoven podle měřené vnější otáčkové charakteristiky v automatickém režimu (ustálení měřeného bodu je předvoleno na 15 sekund). Pro analýzu vlivu n-butanolu na provozní parametry spalovacího motoru byl zvolen bod, který je definován volnoběhem (měřicí bod č. 1), maximálním výkonem ve jmenovitých otáčkách (měřicí bod č. 2) a maximálním točivým momentem a příslušnými otáčkami (měřicí bod č. 3). Každý z měřicích bodů byl nejprve ustálen a následně byly po dobu 60 sekund zaznamenávány jednotlivé veličiny, aby bylo možné statistické zpracování dat (ANOVA). Podle měřené veličiny byla snímací frekvence od 1 Hz (kouřivost) až po 10 kHz (otáčky motoru, tlak uvnitř spalovacího prostoru).

Jako palivo byly zvoleny směsi motorové nafty (bez přísady metylesteru řepkového oleje) a n-butanolu (tab. I.):

- 100 % motorová nafta (100_nafta),
- 95 % motorová nafta a 5 % n-butanolu (95_nafta_5_but),
- 80 % motorová nafta a 20 % n-butanolu (80_nafta_20_but).

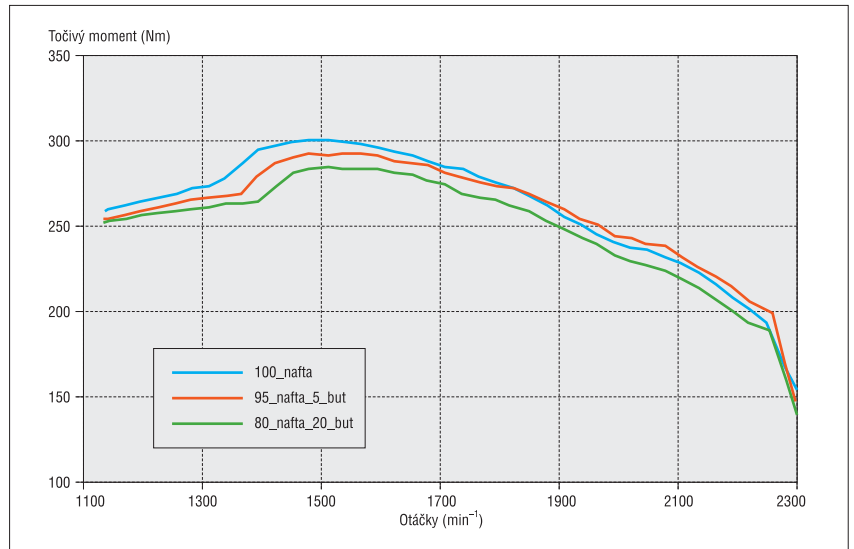
Výsledky

Na obr. 2. jsou zobrazeny průběhy točivého momentu v závislosti na otáčkách. Na základě těchto průběhů pak byly určeny měřicí body, jejichž skutečné měřené hodnoty jsou uvedeny v tab. II. (hodnoty měřené na vývodovém hřídeli traktoru). Hodnoty na obr. 2. a v tab. II. se mírně liší, což je dáno rozdílnou dobou ustálení jednotlivých měřicích bodů.

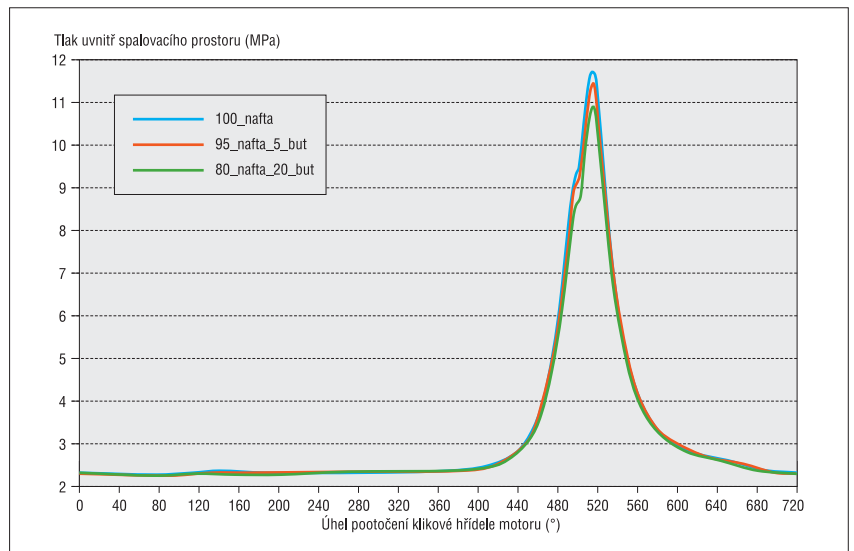
Z tab. II. (zde jsou body nejprve ustáleny a poté 60 sekund snímány měřené veličiny) je zřejmé, že s přidáním n-butanolu do motorové nafty dochází k poklesu výkonových parametrů, což se předpokládalo vzhledem k nižší výhřevnosti n-butanolu (tab. I.).

Na obr. 3. je uveden průběh tlaku uvnitř spalovacího prostoru v měřicím bodu č. 2. Jedná se o celý cyklus zahrnující dvě otáčky čtyřdobého přeplňovaného spalovacího motoru. Pro bližší analýzu je na obr. 4. uveden

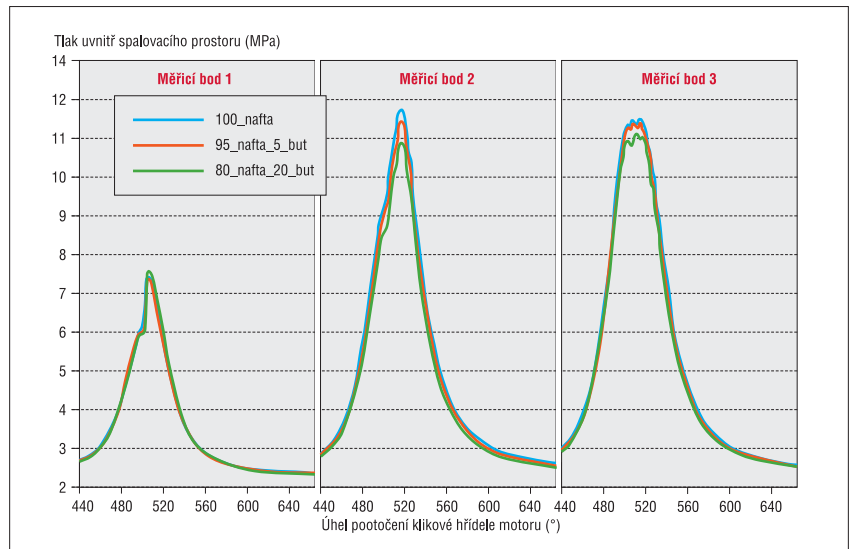
Obr. 2. Průběh točivého momentu



Obr. 3. Průběh tlaku uvnitř spalovacího prostoru – ukázka bodu číslo 2



Obr. 4. Průběh tlaku uvnitř spalovacího prostoru



Tab. II. Definice měřicích bodů

Měřicí bod	100_nafta	95_nafta_5_but	80_nafta_20_but
1 – volnoběžné otáčky (min ⁻¹)	730	730	730
2 – maximální výkon při jmenovitých otáčkách (kW při min ⁻¹)	49,7 při 2202	48,8 při 2202	45,4 při 2202
3 – maximální točivý moment při otáčkách (Nm při min ⁻¹)	297 při 1538	292 při 1538	284 při 1511

výřez 440° až 660° pootočení klikového hřídele motoru. Obr. 3. i obr. 4. zobrazují pouze průměrné hodnoty průběhu tlaku uvnitř spalovacího prostoru, a to u bodu 1 z 365 hodnot, u bodu 2 z 1100 hodnot a u bodu 3 ze 750 hodnot. Směrodatná odchylka se v rámci jednotlivých 720 bodů na cyklus spalovacího motoru (2 otáčky motoru) u bodu 1 pohybuje průměrně od 0,0080 do 0,1295 MPa u bodu 2 od 0,0084 do 0,2599 MPa a u bodu 3 od 0,0082 do 0,1030 MPa.

Z obr. 4. je zřejmé, že s vyšším podílem n-butanolu v motorové naftě došlo k poklesu tlaku uvnitř spalovacího prostoru, zejména při vyšším zatížení. Analýza rozptylu prokázala statisticky významnou změnu maximálního spalovacího tlaku mezi všemi měřenými palivy v měřicích bodech 1, 2 i 3 na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. V tab. III. je uveden výstup analýzy rozptylu dosažených výsledků pro bod 2, doplněný o Tukey HSD post-hoc test.

V měřicím bodu 1 došlo k nevýrazné změně maximálního tlaku nepřesahující 1 %. V bodu 2 došlo k poklesu maximálního tlaku cca o 3,5 % a v bodu 3 došlo k poklesu cca o 7 %.

Střední efektivní tlak u paliva s 5 % n-butanolu v motorové naftě v bodu 2 klesl o 1,7 % a v bodu 3 o 1,6 % ve srovnání s čistou motorovou naftou. U paliva s 20 % n-butanolu v motorové naftě klesl střední efektivní tlak v bodu 2 o 8,5 % a v bodu 3 o 4,5 % ve srovnání s čistou motorovou naftou.

Dále je z grafů na obr. 4. patrné, že zvláště při vyšším zatížení motoru v měřicích bodech 2 a 3 došlo u směsí s podílem n-butanolu po vstříknutí paliva do spalovacího prostoru

k výraznějšímu poklesu tlaku. Tento jev lze vysvětlit vysokým výparným teplem n-butanolu, jehož odpařením poklesne teplota ve spalovacím prostoru, a tím poklesne i tlak.

Závěr a diskuse

V příspěvku je sledován vliv n-butanolu na průběh tlaku uvnitř spalovacího prostoru přepřehovaného spalovacího motoru. Vzhledem k vlastnostem paliva byly voleny směsi 5 % n-butanolu s 95 % motorové nafty a 20 % n-butanolu s 80 % motorové nafty. Při měření byly zjištěny tyto závěry:

- N-butanol ve směsi s motorovou naftou statisticky významně ovlivňuje maximální tlak ve spalovacím prostoru motoru při obou měřených koncentracích ve všech měřených bodech.
- Tlak uvnitř spalovacího prostoru motoru, a to zejména při vyšším zatížení, poklesl s vyšším množstvím n-butanolu v motorové naftě (obr. 4.). V bodu 1 došlo k nevýrazné změně maximálního tlaku nepřesahující 1 %, v bodu 2 došlo k poklesu cca o 3,5 % a v bodu 3 k poklesu cca o 7 %.
- Nejvyššího poklesu středního efektivního tlaku u paliva s 5 % n-butanolu v motorové naftě bylo dosaženo v bodu 2 o 1,7 % a u paliva s 20 % n-butanolu v motorové naftě taktéž v bodu 2, a to cca 8,5 %.

Obecně použití biopaliv na bázi alkoholu ve vznětových spalovacích motorech budí velké rozpaky. Zejména použití paliva E95, které vyžaduje značnou změnu konstrukce spalovacího motoru, a problémy se stabilitou paliva s menšími podíly ethanolu (1). Jak ukázala řada studií, je palivo na bázi butanolu stabilnější ve směsích s motorovou naftou při zachování dobrých mazacích vlastností a s výhodou se dají využít i čisticí schopnosti tohoto paliva (12, 13). Aby byly lépe zachovány provozní parametry spalovacího motoru, jeví se jako velmi zajímavé použití směsného paliva na bázi butanolu a oleje ve směsi s motorovou naftou. V takovémto případě lze očekávat pokles středního efektivního tlaku menší než 3 % a zvýšení podílu biopaliva v palivu. Je nutné se však vypořádat s degradací některých těsnicích prvků (7).

Tento příspěvek byl vytvořen s podporou projektu IGA: 2017:31190/ 1312/3119 – Analýza vlivu biopaliv na průběh tlaku ve spalovacím prostoru přepřehovaného vznětového motoru.

Tab. III. Analýza rozptylu, doplněná o Tukey HSD post-hoc test, pro měřicí bod č. 2 ($\alpha = 0,05$)

ANOVA				
Variabilita	Suma čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	F
Mezi třídami	63,1168	2	31,5584	511,2618
Uvnitř tříd	138,6994	2247	0,0617	
Celková	201,8162	2249		
Tukey HSD Post-hoc test				
100 % nafta vs. 95 % nafta + 5 % n-butanol: Diff = -0,0725, 95 % CI = -0,1026 až -0,0424, p = 0,0000				
100 % nafta vs. 80 % nafta + 20 % n-butanol: Diff = -0,3859, 95 % CI = -0,4160 až -0,3559, p = 0,0000				
95 % nafta + 5 % n-butanol vs. 80 % nafta + 20 % n-butanol: Diff = -0,3135, 95 % CI = -0,3435 až -0,2834, p = 0,0000				

Souhrn

Evropská unie směřuje úsilí na podporu používání biopaliv. Velmi rozšířeným alkoholovým biopalivem je palivo na bázi ethanolu. Použití ethanolu je běžné v zážehových motorech, ale ve vznětových motorech přináší řadu úskalí. Vhodnějším palivem na bázi alkoholu je pro vznětové motory butanol. V příspěvku je popsán vliv n-butanolu, jako přísady v motorové naftě, na tlak uvnitř spalovacího prostoru během NRSC testu motoru. Výsledky ukazují, že při použití paliva s 20 % n-butanolu klesne maximální tlak cca o 7 % a střední efektivní tlak cca o 8,5 %. Při použití trojměsí n-butanolu, oleje a motorové nafty je možno toto snížení omezit při vhodném využití čistící schopnosti n-butanolu.

Klíčová slova: biopalivo, butanol, vznětový motor.

Literatura

- HROMÁDKO, J. ET AL.: Využití paliva E95 ve vznětových motorech. *Listy cukrov. řepař.*, 127, 2011 (2), s. 63–66.
- STADKÝ, V.: *Biobutanol – vhodnější náhrada benzínu*. Biom.cz, [online] <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biobutanol-vhodnejsi-nahrada-benzinu>, cit. 17. 5. 2017.
- DÜRRE, P.: Fermentative butanol production bulk chemical and biofuel. *Annals of N. York Academy of Sci.*, 1125, 2008, s. 353–362.
- QURESHI, N. ET AL.: Butanol production from wheat straw by simultaneous saccharification and fermentation using *Clostridium beijerinckii*: Part I – Batch fermentation. *Biomass Bioener.*, 32, 2008 (2), s. 168–175.
- EZEJI, T. C.; QURESHI, N.; BLASCHEK, H. P.: Production of acetone, butanol and ethanol by *Clostridium beijerinckii* BA101 and in situ recovery by gas stripping. *World Journal of Microbiology Biotechnology*, 19, 2003, s. 595–603
- ALEŠ, Z. ET AL.: Use of microscopy for morphology analysis of wear particles generated in the fuel systems of internal combustion engine. *Manufacturing technology*, 16, 2016 (5), s. 849–853.
- MÜLLER, M. ET AL.: Hodnocení mechanických vlastností elastomerního těsnění pro palivové soustavy vystavené vlivu biopaliv. *Listy cukrov. řepař.*, 132, 2016 (11), s. 350–355.
- VESELÁ, K.; PEXA, M.; MAŘÍK, J.: The effect of biofuels on the quality and purity of engine oil. *Agronomy Research*, 12, 2014 (2), s. 425–430.
- PEXA, M. ET AL.: Reliability and risk treatment centered maintenance. *Journal Mech. Sci. and Technol.*, 28, 2014 (10), s. 3963–3970.
- KUČERA, M.; ALEŠ, Z.; PEXA, M.: Detection and characterization of wear particles of universal tractor oil using a particles size analyzer. *Agronomy Research*, 14, 2016 (4), s. 1351–1360
- HÖNIG, V.; PEXA, M.; LINHART, Z.: Biobutanol standardizing biodiesel from waste animal fat. *Polish J. Environ. Studies*, 24, 2015 (6), s. 2433–2439.
- HÖNIG, V. ET AL.: The distillation characteristics of automotive gasoline containing biobutanol, bioethanol and the influence of the oxygenates. *Agronomy Research*, 13, 2015 (2), s. 558–567.
- HÖNIG, V. ET AL.: Biobutanol standardizing waste cooking oil as a biofuel. *Polish J. Environ. Studies*, 26, 2017 (1), s. 2433–2439.
- MAŘÍK, J. ET AL.: Comparison of the effect of gasoline – ethanol E85 – butanol on performance and emission characteristics of engine Saab 9-5 2.3 l turbo. *Agronomy Research*, 12, 2014 (2), s. 359–366.
- PEXA, M.; MAŘÍK, J.: The impact of biofuels and technical engine condition to its smoke – Zetor 8641 Forterra. *Agronomy Research*, 12, 2014 (2), s. 367–372.
- XIAO, H. ET AL.: Combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with 2,5-dimethylfuran and diesel blends. *Fuel*, 192, 2017, s. 53–59.
- WOO, C. ET AL.: Dependency of engine combustion on blending ratio variations of lipase-catalysed coconut oil biodiesel and petroleum diesel. *Fuel*, 169, 2016, s. 146–157.
- LI, L. ET AL.: Combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with diesel/biodiesel/pentanol fuel blends. *Fuel*, 156, 2015, s. 211–218.
- ISO 8178-4 *Reciprocating internal combustion engines-Exhaust emission measurement-Part 4: Steady-state test cycles for different engine applications*. 2007.
- ATMANLI, A.; İLERI, E.; YÜKSEL, B.: Effects of higher ratios of n-butanol addition to diesel-vegetable oil blends on performance and exhaust emissions of a diesel engine. *Journal of the Energy Institute*, 88, 2015 (3), s. 209–220.
- EN 590 *Automotive fuels. Diesel. Requirements and test methods*. 2013.

Čedík J., Peterka B., Mader D.: Effect of N-Butanol on Operational Parameters of Compression Ignition Engine

The European Union aims to promote the use of biofuels. A very widespread alcohol-based biofuel is ethanol. The utilization of ethanol is common in spark ignition engines, but the use of ethanol in compression ignition engines is very problematic. A more suitable alcohol-based biofuel for compression ignition engines is butanol. This contribution deals with the effect of n-butanol as an admixture in diesel fuel on the pressure inside the combustion chamber during NRSC engine test. The results showed a decrease in maximum pressure by approx. 7% and in mean effective pressure by approx. 8.5% at 20% concentration of n-butanol in the fuel. When using the n-butanol-vegetable-oil-diesel fuel blend, it is possible to reduce the pressure decrease, while utilizing the cleansing properties of butanol.

Key words: biofuel, butanol, diesel engine.

Kontaktní adresa – Contact address:

Ing. Jakub Čedík, Ph. D.; Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, Katedra jakosti a spolehlivosti strojů, Kamýčká 129, 165 21 Praha 6 – Suchbát, Česká republika, e-mail: cedik.jakub@seznam.cz

ROZHLEDY

Bergwall Ch.

Nové mikrobiologické výzvy pro cukrovarnictví zaměřené na termofilní acidofilní bakterie (New microbiological challenges for the sugar industry with focus on thermophilic acidophilic bacteria)

Článek pojednává o možném výskytu guajakolu v cukrovarnických produktech, který vzniká jako produkt termofilních acidofilních bakterií. Bakterie produkující guajakol se velice zřídka vyskytují v granulovaném bílém cukru, zatímco v tekutých cukrech ne. Bakterie, které se do provozu dostanou s půdní mikroflórou, se kompletně zlikvidují při epuraci. Občas se ale stane, že dodatečná kontaminace se objeví v sirupech od A-cukroviny. K eliminaci termofilních acidofilních bakterií lze použít jak tepelné, tak i ostatní techniky, včetně ošetření pomocí UV-záření.

Zuckerind. / Sugar Ind., 143, 2018, č. 1, s. 28–32.

Kadlec